

(19)



JAPANESE PATENT OFFICE

PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11) Publication number: **07037769 A**

(43) Date of publication of application: **07.02.95**

(51) Int. Cl.

**H01L 21/027**

(21) Application number: **05197679**

(22) Date of filing: **16.07.93**

(71) Applicant: **NIPPON TELEGR & TELEPH  
CORP <NTT>**

(72) Inventor: **TAKEUCHI YOSHINOBU**

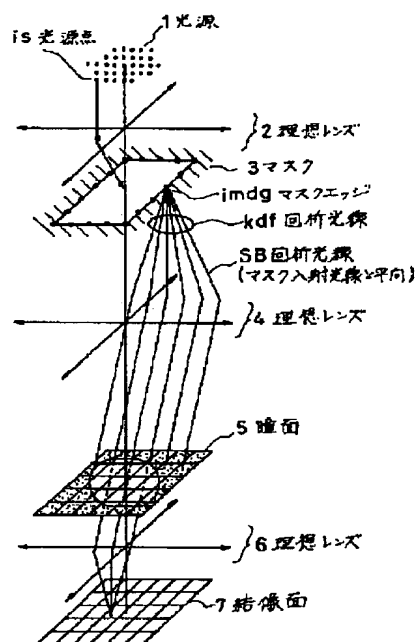
(54) **SIMULATING METHOD FOR IMAGE IN  
PROJECTION OPTICAL SYSTEM**

(57) Abstract:

**PURPOSE:** To provide a simulation method of projection optical image which can calculate three-dimensional vector components of the imagery distribution of a large aperture projection optical system.

**CONSTITUTION:** A mask 3 and an eye surface are divided into lattice types. Rays generated from the mask surface, and rays generated from the diffraction image of a light source projected on the eye surface are traced so as to be matched with the lattices. Thereby the electromagnetic field and the sum of intensity on the imagery surface are calculated.

**COPYRIGHT:** (C)1995,JPO



```

graph TD
    SYNTH[SYNTH 110] --> Start1[光線走査の開始 111]
    Start1 --> MaskScan[マスクの光軸中心へ照らす光線の選択 (マスク走査) 120]
    MaskScan --> EdgeDetect[マスクエッジ位置の検出 130]
    EdgeDetect --> PosDetect[照射光線照射位置の検出 131]
    PosDetect --> PosDecide[照射光線照射位置の決定 132]
    PosDecide --> Irradiate1[照射光線照射 133]
    Irradiate1 --> Measure1[光線の計測/測定 134]
    Measure1 --> Irradiate2[照射光線照射 135]
    Irradiate2 --> Defocus1[デフォーカス計測/距離計測 136]
    Defocus1 --> Measure2[光線の計測/距離計測 137]
    Measure2 --> PosDetect2{マスク面所定位置の位置検出 140}
    PosDetect2 -- NO --> EdgeDetect2{マスクエッジ位置の位置検出? 141}
    EdgeDetect2 -- YES --> PosDecide2[照射光線照射位置の決定 142]
    PosDecide2 --> Irradiate3[照射光線照射 143]
    Irradiate3 --> Measure3[光線の計測/測定 144]
    Measure3 --> Irradiate4[照射光線照射 145]
    Irradiate4 --> Defocus2[デフォーカス計測/距離計測 146]
    Defocus2 --> Measure4[光線の計測/距離計測 147]
    Measure4 --> PosDetect3{マスクエッジ位置の位置検出? 148}
    PosDetect3 -- YES --> Irradiate5[照射光線照射位置の決定 149]
    Irradiate5 --> Irradiate6[照射光線照射 150]
    Irradiate6 --> Measure5[照射光線照射位置の決定 151]
    Measure5 -- YES --> End1[END 152]
    End1 --> Irradiate7[照射光線照射 153]
    Irradiate7 --> Irradiate8[照射光線照射 154]
    Irradiate8 --> Irradiate9[照射光線照射 155]
    Irradiate9 --> Irradiate10[照射光線照射 156]
    Irradiate10 --> Irradiate11[照射光線照射 157]
    Irradiate11 --> Irradiate12[照射光線照射 158]
    Irradiate12 --> Irradiate13[照射光線照射 159]
    Irradiate13 --> Irradiate14[照射光線照射 160]
    Irradiate14 --> Irradiate15[照射光線照射 161]
    Irradiate15 --> Irradiate16[照射光線照射 162]
    Irradiate16 --> Irradiate17[照射光線照射 163]
    Irradiate17 --> Irradiate18[照射光線照射 164]
    Irradiate18 --> Irradiate19[照射光線照射 165]
    Irradiate19 --> Irradiate20[照射光線照射 166]
    Irradiate20 --> Irradiate21[照射光線照射 167]
    Irradiate21 --> Irradiate22[照射光線照射 168]
    Irradiate22 --> Irradiate23[照射光線照射 169]
    Irradiate23 --> Irradiate24[照射光線照射 170]
    Irradiate24 --> Irradiate25[照射光線照射 171]
    Irradiate25 --> Irradiate26[照射光線照射 172]
    Irradiate26 --> Irradiate27[照射光線照射 173]
    Irradiate27 --> Irradiate28[照射光線照射 174]
    Irradiate28 --> Irradiate29[照射光線照射 175]
    Irradiate29 --> Irradiate30[照射光線照射 176]
    Irradiate30 --> Irradiate31[照射光線照射 177]
    Irradiate31 --> Irradiate32[照射光線照射 178]
    Irradiate32 --> Irradiate33[照射光線照射 179]
    Irradiate33 --> Irradiate34[照射光線照射 180]
    Irradiate34 --> Irradiate35[照射光線照射 181]
    Irradiate35 --> Irradiate36[照射光線照射 182]
    Irradiate36 --> Irradiate37[照射光線照射 183]
    Irradiate37 --> Irradiate38[照射光線照射 184]
    Irradiate38 --> Irradiate39[照射光線照射 185]
    Irradiate39 --> Irradiate40[照射光線照射 186]
    Irradiate40 --> Irradiate41[照射光線照射 187]
    Irradiate41 --> Irradiate42[照射光線照射 188]
    Irradiate42 --> Irradiate43[照射光線照射 189]
    Irradiate43 --> Irradiate44[照射光線照射 190]
    Irradiate44 --> Irradiate45[照射光線照射 191]
    Irradiate45 --> Irradiate46[照射光線照射 192]
    Irradiate46 --> Irradiate47[照射光線照射 193]
    Irradiate47 --> Irradiate48[照射光線照射 194]
    Irradiate48 --> Irradiate49[照射光線照射 195]
    Irradiate49 --> Irradiate50[照射光線照射 196]
    Irradiate50 --> Irradiate51[照射光線照射 197]
    Irradiate51 --> Irradiate52[照射光線照射 198]
    Irradiate52 --> Irradiate53[照射光線照射 199]
    Irradiate53 --> Irradiate54[照射光線照射 200]
  
```

**【特許請求の範囲】**

**【請求項1】** マスクパタンの投影光学系によるウエハ上の結像面への投影像をシミュレーションする方法であって、マスク面から発生する光線を結像面まで追跡するステップと、瞳面上に投影される光源の回折像から前記結像面への光線を追跡するステップとを有することを特徴とする投影光学像のシミュレーション方法。

**【請求項2】** 請求項1の投影光学系のシミュレーション方法において、前記マスク面から発生する光線を結像面まで追跡するステップは、前記マスクのエッジによる回折を計算するステップと、前記マスクで回折されない光線を追跡するステップと、光源点毎に前記瞳面上および結像面上の電磁界および強度の和を求めるステップとを有することを特徴とする投影光学像のシミュレーション方法。

**【請求項3】** 請求項2の投影光学系のシミュレーション方法において、前記マスクのエッジによる回折を計算するステップは、前記マスクのエッジ上の点を回折エッジ点として選択するステップと、回折光線を発生するステップと、前記回折光線を近軸変換あるいは近軸量も含む収差のべき級数変換を行うステップと、前記結像面上のデフォーカス量を計算するステップと、前記瞳面上および結像面上の光線を計測するステップとを有することを特徴とする投影光学像のシミュレーション方法。

**【請求項4】** 請求項2の投影光学系のシミュレーション方法において、前記マスクで回折されない光線を追跡するステップは、前記マスク上の点を出発点として選択するステップと、前記出発点に応じた光線を発生するステップと、この光線を近軸変換あるいは近軸量も含む収差のべき級数変換を行うステップと、前記結像面上のデフォーカス量を計算するステップと、前記瞳面上および結像面上の光線を計測するステップとを有することを特徴とする投影光学像のシミュレーション方法。

**【請求項5】** 請求項1の投影光学系のシミュレーション方法において、前記瞳面上に投影される光源の回折像から前記結像面への光線を追跡するステップは、瞳面開口部の点を瞳面開口部上光源点として選択するステップと、前記結像面上の結像点に向かう光線を選択するステップと、この光線を近軸変換あるいは近軸量も含む収差のべき級

数変換を行うステップと、

前記結像面上のデフォーカス量を計算するステップと、前記結像面上の光線を計測するステップと、前記瞳面上光源点毎に前記結像面上の電磁界および強度の和を求めるステップとを有することを特徴とする投影光学像のシミュレーション方法。

**【発明の詳細な説明】****【0001】**

**【産業上の利用分野】** 本発明は、投影光学像のシミュレーション方法に関し、特に大規模集積回路の製造時のパターン形成に使用する投影露光法における投影光学像を対象とする投影光学像のシミュレーション方法に関するものである。

**【0002】**

**【従来の技術】** 大規模集積回路 (Large Scale Integration, LSI) の製造時には、光源、マスクおよびウエハの間に、適切に設計された光学レンズを配置した光学系を用いることにより、所要パタンの描かれたマスクを通してウエハ上に微細パターンを形成する露光法が用いられる。特に、マスクとウエハとの間に配置されたレンズ群は、投影光学系と呼ばれ、その中間に瞳と呼ばれる有限開口を持つ光線の制限板が置かれる。

**【0003】** 近年の投影光学系は、定められたウエハ面上の領域内および定められた瞳径の下では、光の波長により決定される理論限界に近い解像度を持つまでになっており、この場合、マスクに形成された開口部ならびに瞳の開口部において生ずる回折が、投影像の劣化原因であると考えられている。

**【0004】** 従って、ウエハ上に塗布されたレジストに形成されるパタンの特性を予測するため、さらに次のレジスト内解析のステップへの入力として、このような回折効果を受けた投影光学像を計算により求めることが必要とされている。

**【0005】** また、レジストパタンの形成特性をシミュレーションで予測するためには、レジスト内の光の伝搬を解析する必要がある。現在、以下のような2つの方法が用いられている。その一つは、レジストを薄い多層膜に分解し、レジスト内のそれぞれの深さにおけるデフォーカス像の強度と組み合わせて、従来の光学多層膜解析法を用いて光強度分布を求め、同時にレジスト内のエネルギー蓄積分布 (潜像分布) を求める方法であり、もう一方は、電磁界方程式 (Maxwell の方程式) を用いて前述の投影光学像をレジストへの入力として電磁界を解く方法である。

**【0006】** これらは、いずれの方法においても、レジストへエネルギーが蓄積される機構をモデル化して組み込んでいるものであり、前述のようにウエハ面のレジスト近傍における投影光学像を予測することが基本となり、必要とされている。

**【0007】** さらに、最近になって投影光学系に対する

高解像化を目的として、マスクパターンを位相物体で構成する位相シフト法や、光源の形状を互いに離れた4点あるいは輪帯形状とする変形光源照明法等が研究されており、これらの方法による光学像の結像特性を調べる方法として、光学像のシミュレーション計算が注目されており、回折効果を受けた投影光学像をより正確な計算により求めることが必要となっている。

【0008】従来、このような回折効果を受けた投影光学像の計算方法として、フーリエ変換を利用したものが提案されていた。すなわち、マスク開口のパターンを2次元フーリエ展開し、そこで得られるフーリエ係数に、有限の大きさの光源中の一点に対する瞳の透過制限の条件を掛けて得られる量に対して、2次元フーリエ逆変換を施し、この結果の2乗を光源中のある1点が寄与する投影光学像の強度分布とし、光源の広がり全体に対してこの和をとることにより光強度分布を得るものであり、この計算方法の特徴は、フーリエ変換を利用しているため、計算時間が短くて済むことである。

【0009】

【発明が解決しようとする課題】従って、このようなフーリエ変換を用い従来の投影光学像の計算方法では、光学系を伝搬する光線の光路長の差の計算に線形近似を用いているため、最近の大開口の瞳を持つ投影光学系に対する適用には限界があると指摘されている。さらに、従来の投影光学像の計算方法は、本来、光に備わっている3次元電磁界ベクトルを、1つのスカラ成分で近似しているため、光学レンズによる光の屈折において生ずる各ベクトル成分の変化を無視していることになり、この近似は、瞳の大きさが大きくなって行くに従って、その適用に限界が出てくる。

【0010】また、レジスト内の電磁界解析においても、従来の投影光学像の計算方法を利用してレジストへの入力電界を与えた場合、光強度分布の平方根を電界強度とするものであって、これによりその電界の位相分布は求められず、これを無視せざるを得なかった。実際には、レジストへ入射する電界の位相は、パターン形状と光学条件に依存した位相分布を持つものであり、これによりレジストの下地が凹凸形状をしている場合には、斜め方向に伝搬する成分が発生し、全体の電磁界分布に影響を及ぼすため、電界の位相分布を考慮する必要がある。

【0011】一方、従来のフーリエ変換による投影光学像の計算方法をベクトル化する努力も行われているが、その手続きはかなり複雑である。

【0012】また、従来よりアンテナなどの解析に用いられてきた幾何光学的解析理論を、投影光学系へ適用した事例はないが、これを適用した場合には、光線の経路に光学レンズが作用するため、従来の解析のように、波源と観測点とを設定して光線を追跡することは不可能である。

【0013】さらに投影レンズの中間に位置する瞳面に

は、光源がマスクにより回折されて光源像が形成され、さらにこの像が瞳により回折されるものとなり、このような2段階の回折に幾何光学的回折理論が適用できるか否か知られていない。

【0014】本発明はこのような課題を解決するためのものであり、大開口の投影光学系における結像分布の3次元ベクトル成分を、単純素朴な方法で計算できる投影光学像のシミュレーション方法を提供することを目的としている。

【0015】

【課題を解決するための手段】このような目的を達成するために、本発明による投影光学像のシミュレーション方法は、マスク面から発生する光線を結像面まで追跡するステップと、瞳面上に投影される光源の回折像から結像面への光線を追跡するステップとを有するものである。

【0016】また、マスク面から発生する光線を結像面まで追跡するステップとして、マスクのエッジによる回折を計算するステップと、マスクで回折されない光線を追跡するステップと、光源点毎に瞳面上および結像面上の電磁界および強度の和を求めるステップとを有するものである。

【0017】また、マスクのエッジによる回折を計算するステップとして、マスクのエッジ上の点を回折エッジ点として選択するステップと、回折光線を発生するステップと、回折光線を近軸変換あるいは近軸量も含む収差のべき級数変換を行うステップと、結像面上のデフォーカス量を計算するステップと、瞳面上および結像面上の光線を計測するステップとを有するものである。

【0018】また、マスクで回折されない光線を追跡するステップとして、マスク上の点を出発点として選択するステップと、出発点に応じた光線を発生するステップと、この光線を近軸変換あるいは近軸量も含む収差のべき級数変換を行うステップと、結像面上のデフォーカス量を計算するステップと、瞳面上および結像面上の光線を計測するステップとを有するものである。

【0019】さらに、瞳面上に投影される光源の回折像から結像面への光線を追跡するステップとして、瞳面開口部の点を瞳面開口部上光源点として選択するステップと、結像面上の結像点に向かう光線を選択するステップと、この光線を近軸変換あるいは近軸量も含む収差のべき級数変換を行うステップと、結像面上のデフォーカス量を計算するステップと、結像面上の光線を計測するステップと、瞳面上光源点毎に結像面上の電磁界および強度の和を求めるステップとを有するものである。

【0020】

【作用】従って、マスク面から発生した光線を結像面まで追跡するとともに、瞳面上に投影された光源の回折像から結像面への光線を追跡することにより、マスクパターンの投影光学系によるウエハ上の結像面への投影像がシ

ミュレーションされる。

【0021】また、マスクのエッジによる回折を計算するとともに、マスクで回折されない光線を追跡し、光源点毎に瞳面上および結像面上の電磁界および強度の和を求めることにより、マスク面から発生する光線が結像面まで追跡される。

【0022】また、マスクのエッジ上の各回折エッジ点において発生させた回折光線について、近軸変換あるいは近軸量も含む収差のべき級数変換を行い、結像面上のデフォーカス量を計算し、瞳面上および結像面上の光線を計測することにより、マスクのエッジによる回折が計算される。

【0023】また、マスク上の各点において発生させた光線を近軸変換あるいは近軸量も含む収差のべき級数変換を行い、結像面上のデフォーカス量を計算し、瞳面上および結像面上の光線を計測することにより、マスクで回折されない光線が追跡される。

【0024】さらに、瞳面開口部の点を瞳面開口部上光源点として選択するとともに、結像面上の結像点に向かう光線を選択し、この光線について近軸変換あるいは近軸量も含む収差のべき級数変換を行い、結像面上のデフォーカス量を計算し、結像面上の光線を計測し、瞳面上光源点毎に結像面上の電磁界および強度の和を求めることにより、瞳面上に投影される光源の回折像から結像面への光線が追跡される。

【0025】

【実施例】次に、本発明について図面を参照して説明する。図1は本発明の一実施例である投影光学像のシミュレーション方法を示すフローチャートである。

【0026】図1の投影光学像のシミュレーション方法における計算手順は、大きな二つのループであるループ10およびループ50から構成されている。ループ10は、マスク面から発生する光線を結像面まで追跡する部分であり、マスクエッジによる回折光線を追跡するループ20と、マスクにより回折されない光線を追跡するループ40から構成される。ループ50は、ループ10により計算された瞳面における光源の回折像から結像面までの光線を追跡する部分である。

【0027】また、図2～4は、投影光学系における各種光線を示す説明図であり、図2はマスクエッジにより回折される回折光線を示す光線図、図3はマスクエッジにより回折されない光線を示す光線図、さらに図4は瞳面から結像面までの光線を示す光線図であり、図2～4の各光線は、それぞれ前述のループ20、40およびループ50により追跡される。

【0028】図2において、1は投影光学系における光源、isは光源1上の任意の光源点であり、2は理想レンズ、3は所要のパターンが描かれているマスク、imgdはマスク3における任意のマスクエッジである。また、kdfはマスクエッジimgdにおいて発生した回折光線、SBは

kdfのうちマスク3への入射光線に平行な回折光線、4は理想レンズ、5は有限開口部を有する光線制御板である瞳の瞳面、6は理想レンズ、7はウエハ面上のレジスト近傍に対応する結像面である。

【0029】今、光源1の任意の光源点isから射出された光線は、理想レンズ2を通過することにより、光源1の位置により決定される傾きを持ってマスク3に照射される。このうち、マスク3のマスクエッジimgdに照射された光線は、ここで回折され、回折光線kdf となって理想レンズ4へ達する。

【0030】なお、回折光線kdf には、マスク3への入射光線と平行な傾きを持った光線、すなわちマスク3を直線的に通過し、マスクエッジにより回折しなかった光線と同じ傾きを持った光線SBが含まれる。

【0031】これらの回折光線は、理想レンズ4を通過することにより、マスクエッジ点の座標により決定される傾きを持った平行光線となって、瞳面5へ到達し、さらに瞳面5の開口部を通過したものは、理想レンズ6を通過した後、結像面7上の一点に結像するものとなる。

【0032】また図3は、マスク3の開口部を通過するとともに、マスクエッジにより回折されない光線を示す光線図であり、同図において、図2と同じまたは同等部分には同一の符号を付してある。imはマスク3上の任意のマスク点を示している。

【0033】今、光源1の各光源点から射出された同じ傾きを持つ光線は、理想レンズ2を通過することにより、マスク3の同一マスク点imに集中した後、マスク3の開口部を直線的に通過して理想レンズ4へ達するとともに、ここでマスク点imの座標により決定される傾きを持つ平行光線となって、瞳面5へ到達し、さらに瞳面5の開口部を通過したものは、理想レンズ6を通過した後、結像面7上の一点に結像する。

【0034】また図4は、瞳面5上に投影される光源1の回折像から結像面7までの光線を示す光線図であり、同図において、図2と同じまたは同等部分には同一の符号を付してある。図4において、(i, j)は、瞳面5を格子に分割したうちの開口部に属する任意の光源点(格子点)、6は理想レンズ、(ii, jj)は、結像面7を格子に分割したうちの任意の結像点を示している。

【0035】今、マスクエッジで回折された光線により結像された瞳面5上の回折像は、瞳面5上の各光源点(i, j)を光源とする光線となって、理想レンズ6を経て、結像面7上のすべての結像点(ii, jj)に到達するものとなる。

【0036】次に図1、2および3を参照して、本発明の動作として、瞳面5および結像面7における光源像を計算する手順(ループ10)について説明する。

【0037】まず、光源1において任意の光源点isを指定し(ステップ110)、この光源点isからマスク3の光軸中心へ向かう光線を選択する(ステップ111)。

これにより、光源点isからの光線が、マスク3を分割するすべての格子点すなわちマスク点に対して、欠けることなくまた重複することなく到達するように規定されることになる。

【0038】次に、光源点isからの光線が任意のマスクエッジimgdで回折し、瞳面5へ到達するまでを計算するループ20、および幾何光学的回折理論に基づき発生させた回折光線を、瞳面5および結像面7において計測するループ30が開始される。

【0039】まず、マスク3の任意のマスクエッジ点imgdを選択し（ステップ120）、選択したマスクエッジ点imgdで発生する回折光線kdfのうち、瞳面5に設けられた任意の格子点への回折光線を1つ選択し（ステップ130）、幾何光学的回折理論に基づき回折光線を発生させる（ステップ131）。

【0040】これは、任意のマスクエッジから回折光線を発生させる場合、1つの光源点がマスクへ及ぼす効果が1つの平面波によるものであるとして、幾何光学的回折理論を適用するものである。

【0041】この幾何光学的回折理論とは、例えば「電磁波問題の基礎解析法」（山下栄吉監修、電子情報通信学会編1987）に解説されているとおり、電磁界が幾何光学成分と回折波成分との和で表されるものであるとし、回折物体と波源および観測点を結ぶ光線を規定する方法として、GTD（Geometric Theory of Diffraction）やUTD（Uniform Theory of Diffraction）が提案されており、簡単な幾何学的な角度計算により回折光線の追跡を可能とするものである。

【0042】特にGTDでは、回折波が生じる回折点を、光学におけるフェルマーの原理を拡張することにより求めている。フェルマーの原理とは、誘電体境界面での屈折や鏡での反射における光の進路が、最短光路をとるものであることを述べたものであり、これによれば、回折波の進路は、散乱体の稜線や角を経由する経路の内、その長さが極値をとる光路となる。

$$\begin{aligned} v1 &= k1 \cdot k0, \quad g1 = |v1| \\ v2_x &= k1_x - k0_x, \quad v2_y = k1_y - k0_y, \quad v2_z = k1_z - k0_z \\ g2 &= |v2| \\ v3 &= v1 \cdot v2, \quad g3 = |v3| \\ v4 &= v1 \cdot e0, \quad g4 = |v4| \end{aligned}$$

【0049】

$$\begin{aligned} ea0 &= |e0| \\ e1_x &= e0_x + v3_x \times g4 \times g2 / g1 / g3 \\ e1_y &= e0_y + v3_y \times g4 \times g2 / g1 / g3 \\ g5 &= ea0^2 - e1_x^2 - e1_y^2 \\ e1_z &= \text{sqrt}(g5) \end{aligned}$$

【0050】なお、近軸変換行列は、レンズの収差を考慮しない場合に適用されるものであり、これを考慮する場合には、入射光線の位置と傾きにより表現された、近軸量を含む収差のべき級数変換式が適用される。

【0043】ここで、回折点における入射光線と同一方向に進む光線（SB）は、フレネル積分の引数が「0」の場合であり、GTDにおけるフレネル積分の近似に起因して、回折係数の発散が生じるという不具合が発生する。このため、このような光線すなわちマスクへの入射光線にほぼ平行な回折光線については、回折係数をフレネル積分を含む表現に戻したより厳密な理論UTDを適用し、その他の回折光線についてはGTDを適用している。

【0044】なお、これらの幾何光学的回折理論に基づき発生させた回折光線は、瞳面5へ到達しその面上で決められた軌跡上に分布するため、これらが瞳面5の格子に整合して分布するように、回折点であるマスクエッジ点imgdから瞳面5上の任意の格子へ達する回折光線kdfのうちの1つを選択している（ステップ130）。

【0045】このように発生させた回折光線は、理想レンズ4の屈折作用により、マスクエッジ点imgdの座標により決定される傾きを持つ平行光線となって、瞳面5へ到達するものとなり、この間の光線は、近軸変換行列に基づき追跡する（ステップ132）。

【0046】光線が理想レンズ4の屈折作用により曲がる場合、すなわちこの光線の伝搬方向ベクトルが変化する場合、この光線に付随する電磁界ベクトルも変化を受けるものとなる。従って、屈折前後の光線の伝搬方向ベクトルおよび屈折前の電磁界ベクトルに基づき、屈折後の電磁界ベクトルを、以下のように導出する。

【0047】今、屈折前の光線の伝搬方向ベクトルをk0、屈折前の電磁界ベクトルをe0とし、また屈折後の伝搬ベクトルをk1とすると、屈折後の電磁界ベクトルe1は、次式により求められる。なお、次式において、k1・k0はベクトル積、|v1|はv1の絶対値を示し、k0x、k0y、k0zは、それぞれk0のx、y、z成分を示し、またsqrt(g5)は、g5の平方根を示している。

【0048】

【0051】次に、瞳面5に達した回折光線を、瞳面5を分割することにより設けられたすべての格子点において計測し、振幅と位相を伴う電磁界3次元ベクトルとして、各格子点毎にベクトル加算し記憶する（ステップ133）。

【0052】さらに、瞳面5の開口部を通過できた回折光線について、前述と同様に理想レンズ6の屈折作用に対応する近軸変換行列に基づき追跡し（ステップ134）、結像面7上でのデフォーカス処理すなわち焦点移動処理を考慮する場合には、デフォーカス効果を示すド

リフト空間のマトリクスに基づき、前述の近軸変換行列と同様の追跡を実施した後（ステップ135）、結像面7上に設けられた各格子点において計測し、振幅と位相を伴う電磁界3次元ベクトルとして、各格子点毎にベクトル加算し記憶する（ステップ136）。

【0053】以上の手順を、マスクエッジimgdで発生する回折光線kdf すべてについて追跡処理が終了するまで、順次、回折光線を選択し、ループ30を繰り返し実施する（ステップ137）。

【0054】また、選択したマスクエッジ点imgdで発生する回折光線kdf すべてについて追跡処理が終了した場合には、マスク3上のすべてのマスクエッジ点における回折光線の追跡処理が終了するまで、順次、マスクエッジ点を選択し、ループ20を繰り返し実施する（ステップ121）。

【0055】マスク3上のすべてのマスクエッジ点における回折光線の追跡処理が終了した場合には、次に、マスクエッジで回折されない光線に関する追跡処理を、幾何光学の規則を適用して、ループ40により実施する。

【0056】まず、マスク3上の任意のマスク点imを選択し（ステップ140）、このマスク点imと、すでに選択されている光源点is（ステップ110）とにより決定される光線を発生させる（ステップ141）。

【0057】これは、図3において、光源1の各光源点isから同じ傾きを持って射出された光線は、理想レンズ2の屈折作用により、マスク3上の同一マスク点imに集束するものであるから、すでに選択されている光源点isのもとで、マスク点imを走査することにより、瞳面5上の各格子点への光線追跡を行うものである。

【0058】従って、このように発生させた光線は、理想レンズ4の屈折作用により、マスク点の座標により決定される傾きを持つ平行光線となって、瞳面5へ到達するものとなり、この間の光線は、前述と同様に近軸変換行列に基づき追跡する（ステップ142）。

【0059】次に、瞳面5に達した光線を、瞳面5を分割することにより設けられたすべての格子点において計測し、振幅と位相を伴う電磁界3次元ベクトルとして、各格子点毎にベクトル加算し記憶する（ステップ143）。

【0060】さらに、瞳面5の開口部を通過できた光線について、前述と同様に理想レンズ6の屈折作用に対応する近軸変換行列に基づき追跡し（ステップ144）、結像面7上でのデフォーカス処理すなわち焦点移動処理を考慮する場合には、デフォーカス効果を示すドリフト空間のマトリクスに基づき、前述の近軸変換行列と同様の追跡を実施した後（ステップ145）、結像面7上に設けられた各格子点において計測し、振幅と位相を伴う電磁界3次元ベクトルとして、各格子点毎にベクトル加算し記憶する（ステップ146）。

【0061】以上の手順を、マスク3上のすべてのマス

ク点について追跡処理が終了するまで、順次、マスク点を選択し、ループ40を繰り返し実施した後（ステップ147）、瞳面5および結像面7上に設けられた各格子点について計測した回折光線、および非回折光線すなわちマスクで回折されなかった光線を、現在指定されている光源点is毎に集計する（ステップ112）。

【0062】また、選択した光源点に関する回折光線および非回折光線の追跡が終了した場合には、すべての光源点に関する光線追跡処理が終了するまで、順次、光源点を選択して、ループ10を繰り返し実施する（ステップ113）。

【0063】次に、マスクエッジで回折された光線および回折されなかった光線により結像された瞳面5上の回折像において、その各格子点を前述のループ10により計測された光線を持つ光源点とみなし、ループ50において選択された格子点から、結像面7上の各結像点へ射出される光線について、ループ60により追跡処理が実施される。

【0064】まず、瞳面5上の格子点すなわち光源点(i, j)が選択され（ステップ150）、次に、この光源点(i, j)から射出される光線のうち、結像面7上の結像点(ii, jj)へ向かう光線が選択される（ステップ160）。

【0065】次に、この光線は、理想レンズ6の屈折作用により、光源点の座標により決定される傾きを持つ平行光線となって、結像面7へ到達するものとなり、この間の光線は、前述と同様に近軸変換行列に基づき追跡する（ステップ161）。

【0066】さらに、結像面7上でのデフォーカス処理すなわち焦点移動処理を考慮する場合には、デフォーカス効果を示すドリフト空間のマトリクスに基づき、前述の近軸変換行列と同様の追跡を実施する（ステップ162）。

【0067】このように結像面7に達した光線を、すべての結像点において計測し、振幅と位相を伴う電磁界3次元ベクトルとして、各結像点毎にベクトル加算し記憶した後（ステップ163）、すべての結像点に向かう光線について追跡処理が終了するまで、順次、光線を選択し、ループ60を繰り返し実施する（ステップ164）。

【0068】また、選択した光源点からのすべての結像点への光線に対する追跡処理が終了した後、結像面7上の各結像点毎で計測した光線を、現在指定されている光源点(i, j)毎に集計する（ステップ151）。このとき、前述の回折光線および非回折光線追跡時に集計しておいた、瞳面開口部を通過し結像面7に達した光線に関する計測結果（ステップ112参照）を各結像点毎に加算し、すべての光線に関する結像面での計測結果を集計する。

【0069】また、選択した瞳面開口部の光源点に関す

る追跡が終了した場合には、瞳面開口部のすべての光源点に関する光線追跡処理が終了するまで、順次、瞳面開口部の光源点を選択して、ループ50を繰り返し実施する（ステップ152）。

【0070】次に、本発明によるウェハ結像面7への投影像のシミュレーション結果として、図5～8を示す。

なお、シミュレーション条件は以下の通りである。

照明光の波長  $\lambda = 0.365 \mu\text{m}$

縮小倍率  $= 1/5$  ( $M=5$ )

理想レンズ2の焦点距離:  $f_1 = 1 \times 10^5 \lambda$

理想レンズ4の焦点距離:  $f_2 = 5 \times 10^5 \lambda$

理想レンズ6の焦点距離:  $f_3 = 1 \times 10^5 \lambda$

【0071】

マスク形状  $: 2.5 \times 7.5 \mu\text{m}$  長方形の縦2列配列（間隔2.5） $\mu\text{m}$

瞳半径  $= 0.6 \times f_3$  ( $NA=0.51$ )

照明光源の等価半径  $\sigma = 0.3$

照明光源の偏波  $: \text{長方形パターンの長手方向に垂直な直線偏波 (x 偏波)}$

照明光源の位相  $: \text{全面同位相}$

【0072】図5(a)は、瞳面5上の回折像のx電界成分の平面分布図、図5(b)は、図5(a)におけるA-A'断面を示す断面図である。図6(a)は、結像面7上の投影像のx電界成分の平面分布図、図6(b)は、図6(a)におけるB-B'断面を示す断面図である。

【0073】図7(a)は、結像面7上の投影像のx電界成分の平面分布図、図7(b)は、図7(a)におけるC-C'断面を示す断面図である。図8(a)は、デフォーカスを上方 $0.75 \mu\text{m}$ とした場合の、結像面7上の投影像のx電界成分の平面分布図、図8(b)は、図8(a)におけるD-D'断面を示す断面図である。

【0074】

【発明の効果】以上説明したように、本発明は、マスクおよび瞳面を格子状に分割し、これに整合させて光線を

追跡することにより、レンズの介在する投影光学系に対しても幾何光学的回折理論が適用できるようにしたので、瞳面上の回折光現像を電磁界ベクトルを含む形で求めることが可能となり、次に瞳面上に投影される回折像を新たな光源とすることにより、最終的に結像面上の電磁界ベクトルを得ることが可能となり、また光線追跡に基づき投影像を計算する方法であるため、収差計算およびデフォーカス計算が極めて容易となる。

【0075】従って、投影光学像のシミュレーション方法において、大開口の投影光学系における結像分布の3次元ベクトル成分を、単純素朴な方法で計算できるという格別な効果を奏するものである。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の一実施例による投影光学像のシミュレーション方法を示すフローチャートである。

【図2】マスクエッジにより回折される回折光線を示す光線図である。

【図3】マスクエッジにより回折されない光線を示す光線図である。

【図4】瞳面から結像面までの光線を示す光線図である。

【図5】計算例として、瞳面上の回折像のx電界成分の平面分布図、およびそのA-A'断面図である。

【図6】計算例として、結像面上の投影像のx電界成分の平面分布図、およびそのB-B'断面図である。

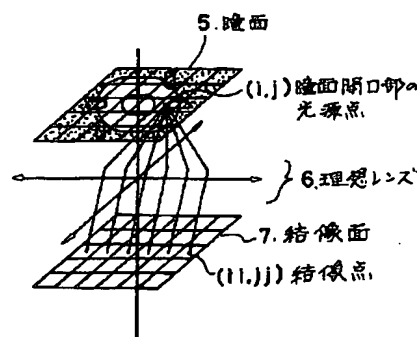
【図7】計算例として、結像面上の投影像のx電界成分の位相分布図、およびそのC-C'断面図である。

【図8】計算例として、デフォーカスを上方 $0.75 \mu\text{m}$ とした場合の、結像面上の投影像のx電界成分の位相分布図、およびそのD-D'断面図である。

【符号の説明】

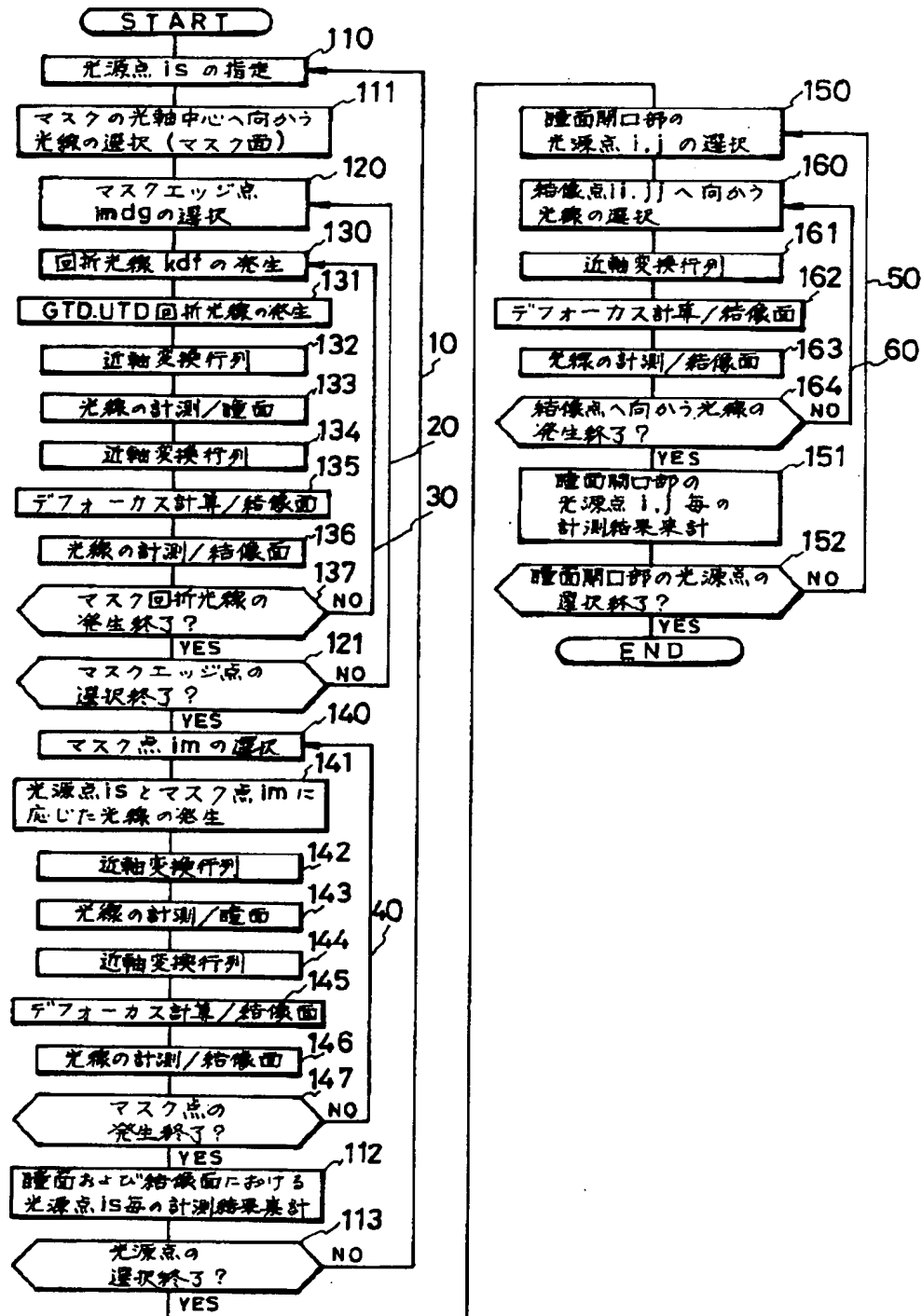
- 1 光源
- 2, 4, 6 理想レンズ
- 3 マスク
- 5 瞳面
- 7 結像面

【図4】

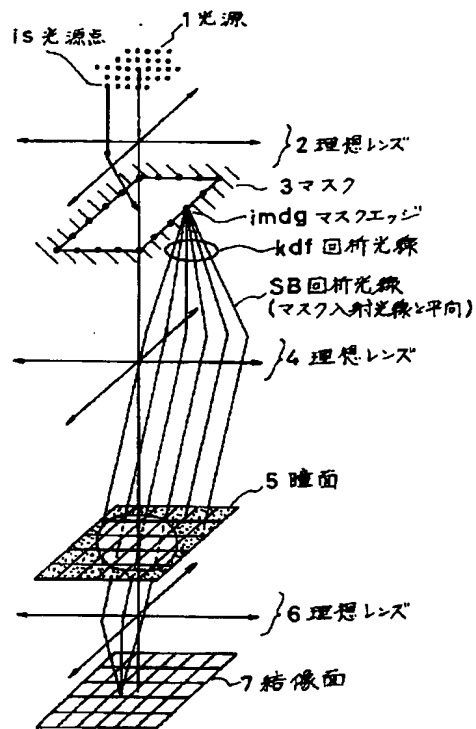




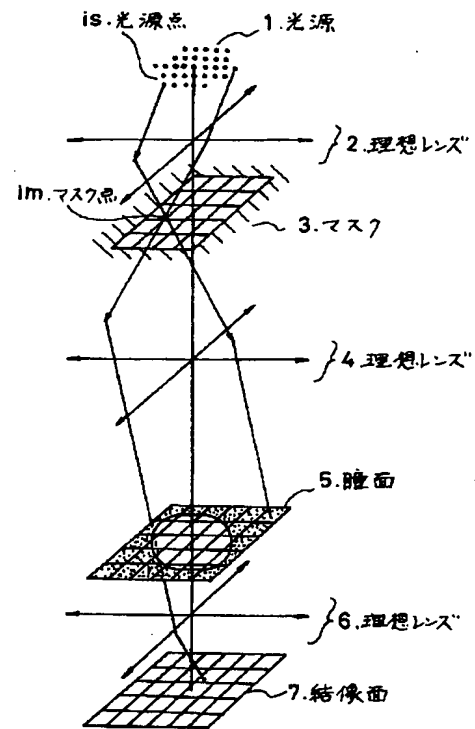
【図1】



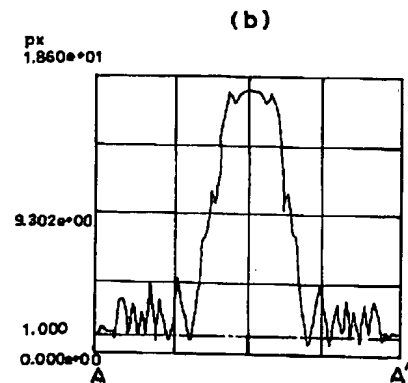
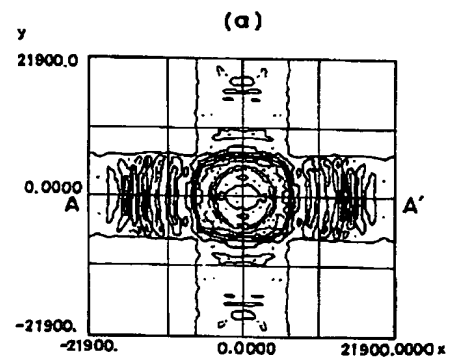
【図2】



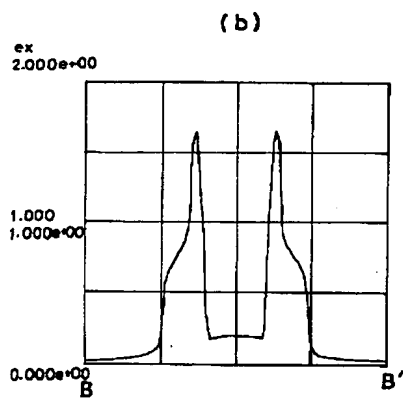
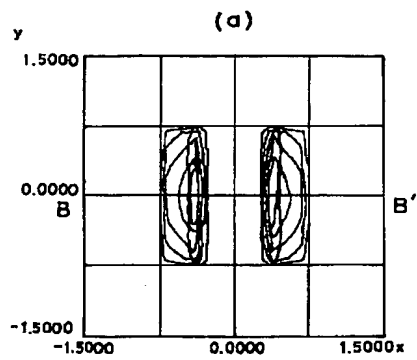
【図3】



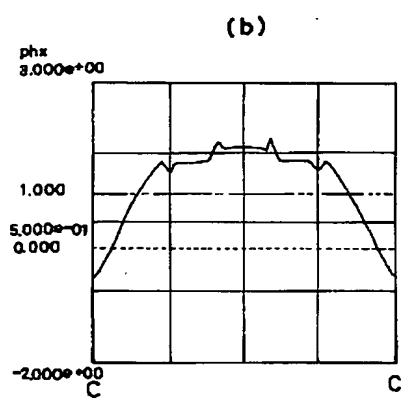
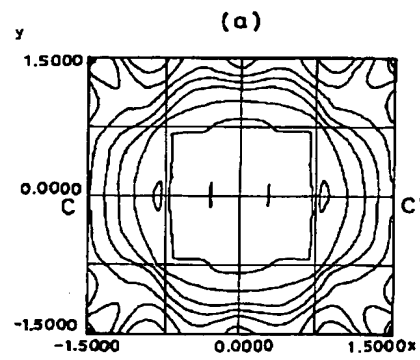
【図5】



【図6】



【図7】



【図8】

